

常绿阔叶园林 6 树种（品种）对模拟酸雨的生理响应及敏感性

李志国, 姜卫兵*, 翁忙玲, 姜 武

(南京农业大学园艺学院, 南京 210095)

摘 要: 以阔瓣含笑 (*Michelia platypetala*)、红花木莲 (*Manglieta insignis*)、金叶含笑 (*Michelia foveolata*)、乐东拟单性木兰 (*Parakmeria lotungensis*) 和杨梅 (*Myrica rubra*) 品种 ‘东魁’、‘荸荠种’ 等 6 个常绿阔叶树为材料, 采用盆栽法研究了模拟酸雨处理对其幼苗叶片叶绿素含量、细胞汁液 pH 值、膜伤害和光合气体交换参数等指标的影响。结果表明, pH 5.0 的轻度酸雨对 6 种树木幼苗均未造成明显伤害; 但在 pH < 3.5 的酸雨处理下, 6 种树木幼苗叶片细胞膜透性增加, 并导致细胞汁液 pH 值下降, 叶绿素含量降低, 进而影响光合作用。但不同树种对酸雨表现出不同抗性, 采用模糊数学中的隶属函数值法对供试树种 (品种) 进行评价并划为 3 类: 第 1 类酸敏感树种, 如红花木莲; 第 2 类抗酸性较强树种, 包括 ‘东魁’ 杨梅、金叶含笑、乐东拟单性木兰; 第 3 类抗酸性强树种, 包括阔瓣含笑、‘荸荠种’ 杨梅。

关键词: 阔瓣含笑; 金叶含笑; 红花木莲; 乐东拟单性木兰; 杨梅; 酸雨; 膜伤害; 光合作用; 抗性

中图分类号: S 687

文献标识码: A

文章编号: 0513-353X (2011) 03-0512-07

Physiologic Responses and Sensitivity of Six Garden Plants to Simulated Acid Rain

LI Zhi-guo, JIANG Wei-bing*, WENG Mang-ling, and JIANG Wu

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Abstract. Four species in Magnoliaceae family (*Michelia platypetala*, *Michelia foveolata*, *Parakmeria lotungensis*, *Manglieta insignis*) and two varieties in *Myrica rubra* sieb. et zacc. (‘Dongkui’ and ‘Biqizhong’) were exposed to simulated acid rain (SAR) with different pH values. The chlorophyll content, the pH values of cell sap, membrane damage and gas exchange parameters were determined with pot-grown seedlings. The results showed acid rain treatment at pH 5.0 is unlikely to cause significant damage to those trees, but even has obviously promotion to *M. platypetala*. When treated by acid rain at pH < 3.5, visible foliar injury were induced, membrane lipid preoxidated and permeability increased, Chl. content and the pH values of cell sap were significantly declined. Moreover, gas exchange parameters were altered by SAR treatment. However, the species differed in their susceptibility to acid rain, so it is necessary to apply more than one index to give a comprehensive evaluation on stress resistant. In this article, acidic tolerance of four species in Magnoliaceae family and two varieties in *Myrica rubra* family were evaluated by applying the method of subordinate function value. The results showed the acidic

收稿日期: 2010-12-27; 修回日期: 2011-03-11

基金项目: 江苏省农业科技示范推广项目 (BC2005344)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: weibingj@sohu.com)

tolerance of *Michelia platypetala* and ‘Biqizhong’ were the strongest, the tolerance of ‘Dongkui’, *Michelia fovelata* and *Parakmeria lotungensis* were moderate, *Manglieta insignis* was the weakest.

Key words: *Michelia platypetala*; *Michelia fovelata*; *Manglieta insignis*; *Parakmeria lotungensis*; bayberry; acid rain; membrane damage; photosynthesis; resistance

20 世纪 80 年代中期以来, 工业生产排放的硫化物和氮氧化物愈来愈多, 在大气中形成酸雨 (Tatiana et al., 2002), 对森林、水体和农田等生态系统造成相当大的危害。据调查, 中国华东各省的酸雨污染情况比较严峻, 大部分地区降水的 pH 值小于 4.0, 甚至达到 pH 2.0, 且酸雨的范围也逐渐扩大 (肖艳 等, 2004)。尽管江苏省 2003 年调查年均降雨 pH 在 4.7 左右, 但是为防止更强酸雨的出现对植物的伤害, 有必要研究和筛选抗酸性较强的树种, 为城市园林规划选择树种提供参考。

近年来, 杨梅科和木兰科的许多树种因其四季常绿和适应性广等优点 (姜卫兵 等, 2005), 被广泛应用在城市园林绿化中 (何开跃 等, 2004), 但对其抗酸性缺乏研究 (姜卫兵 等, 2007), 尤其对木兰科树种的研究较少, 而杨梅作为经济树种也主要集中在生物学特性、栽培技术以及品质的改善方面 (茅林春 等, 2004; 郑诚乐 等, 2009), 对其抗酸性研究报道很少 (刘建福, 2007)。

本试验中以 4 个木兰科树种和 2 个杨梅品种为试材, 并根据我国近几年来酸雨出现的范围 (pH 5.6 ~ 2.0) 设定酸性程度不同的酸雨处理, 初步探讨研究模拟酸雨对其生理特性的影响, 为扩大研究常绿阔叶新优园林树种的酸雨敏感性评价, 深入探讨其逆境下生理生态特性奠定基础, 也为该类树种在城市绿化中的推广应用提供一些科学参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2006 年 6—8 月在南京农业大学校园内进行。供试材料取自浙江省农业科学院和江苏省林业科学院, 选用长势一致的 2 年生阔瓣含笑 (*Michelia platypetala*), 红花木莲 (*Manglieta insignis*), 金叶含笑 (*Michelia fovelata*), 乐东拟单性木兰 (*Parakmeria lotungensis*) 实生苗以及杨梅 (*Myrica rubra*) 品种 ‘东魁’ 和 ‘荸荠种’ 嫁接苗 (砧木为野生杨梅), 种植在内径 30 cm, 深 25 cm 的花盆中。盆土按照园土: 基质: 有机肥 = 1: 1: 1 的体积比例混合, 每盆 3 株, 常规管理。随机分成 4 个组, 进行模拟酸雨处理。为避免降雨干扰, 在简易塑料薄膜大棚下栽培。

1.2 模拟酸雨的配制及其喷淋方法

模拟酸雨的离子成分根据当地自然降雨的主要化学成分配制, 先按 $\text{SO}_4^{2-} : \text{NO}_3^- = 5:1$ 体积比配制 pH 1.0 酸雨母液, 用北京哈纳科仪厂生产的 HI99121 便携式土壤酸度计测定并配制 pH 值分别为 2.0、3.5、5.0 共 3 个梯度的模拟酸雨溶液作为处理, 以去离子水作对照 (pH 6.8)。

采用喷雾器喷洒不同 pH 值的模拟酸雨。根据预备试验的胁迫效应表现程度, 喷洒频率为每隔 1 d 喷 1 次, 共 5 次, 每盆每次喷洒量 200 mL, 相当于 2.8 mm 降雨量 (李志国 等, 2007)。每次喷洒酸雨时, 用塑料袋套在花盆上以防土壤酸化。喷淋在下午 4: 00—6: 00 进行。

1.3 测定指标和测定方法

模拟酸雨处理结束后第 3 天上午, 选择植株中上部生长一致的成熟功能叶片, 利用 Li-6400 便携式光合作用测定仪测定叶片净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 及细胞间隙 CO_2 浓度

(C_i), 计算水分利用率 ($WUE = P_n/T_r$)、气孔限制值 ($L_s = 1 - C_i/C_a$), 测定时设 CO_2 浓度为 (380 ± 10) $\mu L \cdot L^{-1}$, 利用 6400-02LED 红蓝光源控制光强 $PFD 800 \text{ mol} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 叶室温度 (30 ± 3) $^{\circ}C$, 相对湿度 60% 左右。测定叶绿素和 MDA 含量 (李合生, 2000), 细胞膜透性 (黄建昌 等, 2005), 细胞汁液 pH (邓仕坚 等, 1992), 重复 3 次。所有数据采用 SAS 软件进行单因素方差分析。

抗酸性综合评价采用模糊数学中的隶属函数值法 (张宏玉 等, 2006), 对树苗叶绿素含量、细胞汁液 pH 值、膜透性、MDA、净光合速率及水分利用效率等指标进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨胁迫对膜伤害指标, 细胞汁液和叶绿素含量的影响

由表 1 可以看出, 随模拟酸雨 pH 值的下降, ‘荸荠种’ 杨梅和阔瓣含笑叶片 MDA 含量没有明显变化; 红花木莲在 pH 5.0、3.5 和 2.0 的酸雨处理下 MDA 含量与对照相比显著增加, 乐东拟单性木兰在 pH 3.5 和 2.0 酸雨的处理下比对照显著增加, 而 ‘东魁’ 杨梅和金叶含笑一直到 pH 2.0 的酸雨处理下才与对照有显著差异。膜透性变化与 MDA 含量变化类似, 随模拟酸雨 pH 值的下降, 红花木莲在 pH 3.5 和 2.0 处理下与对照相比均显著增加, 乐东拟单性木兰仅在 pH 2.0 处理下才与对照有显著差异; ‘荸荠种’ 杨梅则表现一直增加趋势; 而 ‘东魁’ 杨梅、金叶含笑和阔瓣含笑变化不明显。

随模拟酸雨 pH 值的下降, 红花木莲叶片细胞汁液 pH 值呈下降趋势; 而其它树种 (品种) 与对照没有明显差异 (表 1)。

由表 1 可看出, 随酸雨 pH 值的下降, 红花木莲和乐东拟单性木兰叶片叶绿素含量显著下降,

表 1 模拟酸雨对膜伤害指标、叶片细胞汁液 pH 值和叶绿素含量的影响
Table 1 Effects of membrane damage indices, the pH values of cell sap (CS) and the contents of chlorophyll (Chl) under SAR in seedlings leaves

品种 Cultivar	处理 pH Treatment pH	丙二醛/(nmol · g ⁻¹ FW) MDA	膜透性/(%) MP	细胞汁液 pH 值 CS	叶绿素/(mg · g ⁻¹ FW) Chl
红花木莲 <i>Manglieta insignis</i>	6.8 (对照 Control)	0.70±0.03 c	20.34±0.94 c	4.90±0.03 a	1.43±0.10 a
	5.0	0.98±0.07 b	20.45±1.20 c	4.80±0.04 b	1.40±0.14 a
	3.5	0.96±0.09 b	24.78±0.69 b	4.77±0.04 b	1.07±0.11 b
	2.0	1.49±0.01 a	32.96±3.20 a	4.69±0.02 c	0.91±0.03 b
乐东拟单性木兰 <i>Parakmeria lotungensis</i>	6.8 (对照 Control)	0.85±0.05 b	19.33±1.57 b	5.20±0.03 a	2.47±0.05 a
	5.0	0.91±0.11 ab	18.49±2.59 b	5.20±0.06 a	2.44±0.17 a
	3.5	0.94±0.05 ab	20.47±0.66 b	5.15±0.11 a	2.49±0.01 a
	2.0	1.02±0.09 a	25.77±1.73 a	5.11±0.08 a	2.20±0.11 b
‘东魁’ 杨梅 <i>Myrica rubra</i> ‘Dongkui’	6.8 (对照 Control)	0.96±0.01 b	16.64±1.64 a	5.04±0.02 a	2.43±0.05 ab
	5.0	0.96±0.01 b	17.11±1.37 a	5.01±0.05 a	2.51±0.09 a
	3.5	1.06±0.03 a	15.74±2.35 a	5.03±0.05 a	2.33±0.06 b
	2.0	1.02±0.09 ab	15.67±1.17 a	5.00±0.06 a	2.37±0.05 ab
金叶含笑 <i>Michelia foveolata</i>	6.8 (对照 Control)	1.08±0.09 b	19.88±2.67 a	4.98±0.06 a	3.34±0.04 a
	5.0	1.10±0.02 b	20.03±0.58 a	4.98±0.11 a	3.28±0.15 a
	3.5	1.09±0.03 b	20.63±2.18 a	5.02±0.08 a	3.22±0.07 a
	2.0	1.13±0.04 a	21.05±1.33 a	5.00±0.04 a	3.34±0.03 a
‘荸荠种’ 杨梅 <i>Myrica rubra</i> ‘Biqizhong’	6.8 (对照 Control)	0.81±0.08 a	10.62±0.49 ab	5.15±0.08 a	3.41±0.11 a
	5.0	0.81±0.02 a	10.63±0.66 b	5.19±0.06 a	3.28±0.10 a
	3.5	0.77±0.02 a	11.16±0.28 a	5.11±0.11 a	3.40±0.05 a
	2.0	0.79±0.01 a	10.99±0.64 ab	5.06±0.09 a	3.27±0.10 a
阔瓣含笑 <i>Michelia platypetala</i>	6.8 (对照 Control)	1.68±0.01 a	14.49±1.81 a	5.24±0.06 a	2.07±0.09 b
	5.0	1.64±0.05 a	15.90±1.42 a	5.25±0.10 a	2.38±0.03 a
	3.5	1.67±0.03 a	14.44±1.19 a	5.24±0.06 a	2.32±0.02 a
	2.0	1.66±0.03 a	15.27±2.98 a	5.25±0.04 a	1.99±0.13 b

注: 数据为同一处理 3 次重复的平均值 ± 标准差, 同一材料同列具有相同字母标记的数字间无显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Data presented in the table are mean values ± SD of three repetitions in the same treatments. The same letter of a same material and in the same column represents that there are no difference among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

其中, 红花木莲在 pH 3.5 和 2.0 的处理下与对照呈显著差异, 而乐东拟单性木兰仅 pH 2.0 处理下与对照有显著差异。‘东魁’杨梅和阔瓣含笑随酸雨酸度的增加呈先上升后降低的趋势。金叶含笑和‘荸荠种’杨梅均未与对照达到显著差异。

2.2 模拟酸雨胁迫对光合气体交换参数的影响

表 2 表明, 随模拟酸雨 pH 值的下降, 红花木莲叶片在 pH 3.5 和 2.0 酸雨处理下, 乐东拟单性木兰和‘东魁’杨梅在 pH 2.0 酸雨处理下 P_n 值显著低于对照, 金叶含笑和‘荸荠种’杨梅没有明显变化, 而阔瓣含笑呈先上升而后下降到对照水平。

模拟酸雨对 6 个供试树种 (品种) 蒸腾速率的影响趋势比较复杂。随着酸雨 pH 值的下降, 红花木莲呈下降趋势, 乐东拟单性木兰和阔瓣含笑呈先上升后下降趋势, 金叶含笑呈先下降后上升到对照水平, ‘荸荠种’杨梅呈上升趋势, ‘东魁’杨梅基本保持不变 (表 2)。

随模拟酸雨 pH 值的下降, 红花木莲、‘东魁’杨梅叶片水分利用效率呈下降趋势, 并且均在 pH 3.5 的酸雨处理下与对照呈显著差异, ‘荸荠种’杨梅和金叶含笑呈先上升而后下降趋势, 但‘荸荠种’杨梅 WUE 值在 pH 2.0 下低于对照, 而金叶含笑仅下降到对照水平。乐东拟单性木兰和阔瓣含笑与对照没有明显变化。

表 2 表明, 随酸雨 pH 值的下降, 红花木莲在 pH 3.5 和 2.0 酸雨处理下, 乐东拟单性木兰和‘东魁’杨梅在 pH 2.0 酸雨处理下气孔导度显著低于对照, 金叶含笑和阔瓣含笑呈先上升后下降趋势, 而‘荸荠种’杨梅则表现先下降后上升趋势。

随酸雨 pH 值的下降, 6 个供试树种 (品种) 叶片 C_i 变化规律不明显, 但总得来说, 随模拟酸雨 pH 值的下降, 红花木莲、乐东拟单性木兰叶片 C_i 呈上升趋势; 而‘东魁’杨梅呈下降趋势; 金叶含笑和‘荸荠种’杨梅没有明显变化; 阔瓣含笑又呈先上升后下降趋势。

表 2 模拟酸雨对叶片气体交换参数的影响

Table 2 Effects of gas exchange parameters in seedlings leaves under SAR

品种 Cultivar	处理 pH Treatment pH	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) P_n	蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) T_r	水分利用 效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) WUE	气孔导度/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) G_s	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) C_i	气孔限制 值 L_s
红花木莲 <i>Manglieta insignis</i>	6.8(对照 Control)	5.56±0.28 a	4.94±0.04 a	1.13±0.06 a	0.11±0.01 a	252.80±3.87 c	0.33±0.01 a
	5.0	5.14±0.32 a	4.78±0.05 a	1.08±0.06 a	0.10±0.01 a	267.20±8.13 b	0.30±0.02 b
	3.5	3.19±0.43 b	3.95±0.21 b	0.81±0.10 b	0.09±0.00 b	287.60±6.56 a	0.24±0.02 c
	2.0	2.52±0.07 c	3.30±0.35 c	0.76±0.08 b	0.05±0.00 c	295.60±5.12 a	0.22±0.01 d
乐东拟单性 木兰 <i>Parakmeria lotungensis</i>	6.8(对照 Control)	5.52±0.31 a	4.66±0.21 b	1.18±0.10 a	0.09±0.00 b	203.20±22.30 c	0.47±0.06 a
	5.0	5.57±0.44 a	4.85±0.07 a	1.15±0.09 a	0.09±0.00 b	238.20±7.73 b	0.38±0.02 b
	3.5	5.33±0.41 a	4.82±0.06 ab	1.11±0.08 a	0.09±0.00 b	241.80±7.73 b	0.37±0.02 b
	2.0	4.00±0.42 b	3.25±0.09 c	1.23±0.10 a	0.10±0.00 a	275.00±7.87 a	0.30±0.02 c
‘东魁’杨梅 <i>Myrica rubra</i> ‘Dongkui’	6.8(对照 Control)	6.54±0.18 a	6.35±0.40 a	1.03±0.04 a	0.20±0.01 a	269.60±7.14 a	0.27±0.01 b
	5.0	6.34±0.21 a	6.22±0.55 a	1.02±0.06 a	0.20±0.02 a	268.00±5.55 a	0.26±0.01 b
	3.5	6.40±0.21 a	6.46±0.40 a	0.99±0.08 ab	0.20±0.00 a	270.40±6.56 a	0.26±0.02 b
	2.0	5.52±0.22 b	5.92±0.07 a	0.93±0.04 b	0.18±0.02 b	258.20±3.19 b	0.29±0.01 a
金叶含笑 <i>Michelia foveolata</i>	6.8(对照 Control)	3.84±0.37 a	4.01±0.05 ab	0.96±0.09 b	0.07±0.00 b	257.20±14.36 a	0.32±0.04 a
	5.0	3.83±0.22 a	3.56±0.05 c	1.08±0.05 a	0.07±0.00 b	269.00±11.44 a	0.30±0.04 a
	3.5	3.78±0.22 a	3.97±0.05 b	0.95±0.06 b	0.08±0.00 a	265.40±5.64 a	0.30±0.01 a
	2.0	3.72±0.20 a	4.07±0.03 a	0.91±0.05 b	0.07±0.00 b	258.40±5.04 a	0.32±0.02 a
‘荸荠种’ 杨梅 <i>Myrica rubra</i> ‘Biqizhong’	6.8(对照 Control)	4.65±0.36 a	2.50±0.06 c	1.86±0.18 ab	0.06±0.00 ab	236.20±8.70 a	0.40±0.02 a
	5.0	4.57±0.55 a	2.28±0.31 c	2.00±0.37 a	0.05±0.01 b	232.80±10.65 a	0.40±0.03 a
	3.5	4.73±0.25 a	2.88±0.04 b	1.64±0.07 bc	0.06±0.00 a	232.60±5.71 a	0.40±0.01 a
	2.0	4.66±0.27 a	3.33±0.05 a	1.40±0.06 c	0.06±0.00 a	239.40±8.94 a	0.38±0.02 a
阔瓣含笑 <i>Michelia platypetala</i>	6.8(对照 Control)	6.28±0.16 bc	3.52±0.02 d	1.68±0.04 a	0.07±0.00 d	215.80±4.02 d	0.44±0.01 a
	5.0	8.95±0.22 a	5.50±0.06 a	1.63±0.02 a	0.18±0.00 a	263.80±1.94 a	0.30±0.00 d
	3.5	6.53±0.38 b	4.07±0.05 b	1.60±0.09 a	0.10±0.00 b	238.20±6.62 b	0.37±0.02 c
	2.0	6.07±0.17 c	3.68±0.02 c	1.65±0.04 a	0.09±0.00 c	229.80±3.06 c	0.39±0.01 b

表2表明, 随模拟酸雨pH值的下降, 红花木莲和乐东拟单性木兰气孔限制值呈下降趋势; ‘东魁’ 杨梅和阔瓣含笑呈上升趋势, 金叶含笑、 ‘荸荠种’ 杨梅没有明显变化。

2.3 供试树种（品种）抗酸性综合评判分析

采用模糊数学中隶属函数值法（张宏玉 等，2006）和Fisher最优分割法（史竞男 等，2005）计算出在模拟酸雨条件下供试树种生理指标的隶属函数值、权重、综合评判值（D值）及其抗酸性评定（表3）。从D值可以看出, 6个树种抗酸性强弱次序为, 阔瓣含笑 > ‘荸荠种’ 杨梅 > ‘东魁’ 杨梅 > 金叶含笑 > 乐东拟单性木兰 > 红花木莲。用Fisher最优先分割法进一步将上述树种（品种）划为3类: 第1类, 红花木莲, D值 ≤ 0.04 , 为酸敏感树种（在本试验系统中pH ≤ 3.5 的酸雨处理下, 叶绿素含量、膜透性、MDA、细胞汁液pH值、净光合速率等生理指标受到明显影响）; 第2类, 包括 ‘东魁’ 种杨梅、金叶含笑、乐东拟单性木兰, $0.54 \leq D值 \leq 0.60$, 为抗酸较强树种（在本试验系统中pH ≤ 2.0 的酸雨下, 叶绿素含量、膜透性、MDA、细胞汁液pH值、净光合速率等生理指标受到明显影响）; 第3类, 阔瓣含笑, D值 ≥ 0.79 , 为抗酸强的树种（在本试验系统中pH 2.0的酸雨下, 叶绿素含量、膜透性、MDA、细胞汁液pH值、净光合速率等生理指标均未受到明显影响）。

表 3 pH 2.0 酸雨条件下供试树种（品种）生理指标隶属函数值、权重、综合评判值及其抗酸性评定
Table 3 Subordinative function value (SFV), weight coefficient (WC), D-value and evaluation of acidic tolerance of every varieties of physiological indexes of every varieties under SAR at pH 2.0

品种 Cultivar	参数 Parameter	阔瓣含笑 <i>Michelia platypetala</i>	‘荸荠种’ 杨梅 <i>Myrica rubra</i> ‘Biqizhong’	‘东魁’ 杨梅 <i>Myrica rubra</i> ‘Dongkui’	金叶含笑 <i>Michelia fovelata</i>	乐东拟单性木兰 <i>Parakmeria lotungensis</i>	红花木莲 <i>Manglieta insignis</i>
叶绿素 Chl	权重/WC	0.14	0.23	0.17	0.24	0.16	0.06
	隶属函数值/SFV	0.44	1.00	0	0.53	0.97	0.6
细胞汁液 pH 值 CP	权重/WC	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16
	隶属函数值/SFV	1	0.55	0	0.75	0.66	0.55
膜透性 MP	权重/WC	0.13	0.09	0.13	0.17	0.21	0.27
	隶属函数值/SFV	0.81	0.54	0	0.33	1.00	0.79
丙二醛 MDA	权重/WC	0.23	0.11	0.14	0.16	0.14	0.21
	隶属函数值/SFV	0	0.64	0.2	0.74	1.00	0.74
净光合速率 P_n	权重/WC	0.23	0.18	0.21	0.14	0.15	0.10
	隶属函数值/SFV	1	0.34	0	0.42	0.60	0.85
水分利用效率 WUE	权重/WC	0.24	0.20	0.14	0.13	0.18	0.11
	隶属函数值/SFV	1	0.17	0	0.53	0.72	0.19
D 值 D-value		0.81	0.79	0.6	0.59	0.54	0.04
抗酸性评定 Acid resistance evaluation		强 Strongest	强 Strongest	较强 Moderate	较强 Moderate	较强 Moderate	酸敏感 Weakest

3 讨论

许多研究表明, 酸雨可以破坏植物叶表面的腊质和角质层, 使酸性物质通过气孔或表皮进入体内, 进而引起生理代谢紊乱, 甚至死亡（邱栋梁和刘星辉, 1999; 吕均良 等, 1999）。本试验结果显示, 在轻度酸雨 pH 5.0处理下, ‘荸荠种’ 和 ‘东魁’ 杨梅, 金叶含笑和乐东拟单性木兰叶片叶绿素含量、净光合速率、膜透性等与对照相比没有明显变化, 尤其是阔瓣含笑叶绿素, 净光合速率和蒸腾速率有显著增加趋势, 表明 pH > 5.0的轻度酸雨处理在一定程度上不但不会对植物造成伤害, 反而还会促进植物的生长。梁骏等（2008）研究结果也显示, 随着酸雨酸度的增强, 油菜产量先增加而后减少, pH 5.1的酸雨使油菜增产最大。导致这种结果的原因可能是轻微酸雨的增加能够提供给土壤中未充足的NO₃⁻, 刺激植物叶绿素的合成, 从而提高叶片的光合代谢能力。

本研究结果也显示随着酸雨酸度的增加, 供试树种叶片膜透性和丙二醛含量增大, 尤其是红花

木莲, 乐东拟单性木兰, ‘冬魁’ 杨梅在 $\text{pH} \leq 3.5$ 处理下与对照呈极显著差异, 且叶绿素含量以及净光合速率等生理指标也显著下降, 这说明 $\text{pH} 3.5$ 的酸雨影响了植物的生长。其可能的伤害机理是, 较强酸度的酸雨进入植物体内后, 导致植物体内大量产生具有破坏性的中间产物超氧阴离子自由基, 使抗氧化酶系统的协调作用失衡, CAT 活性急剧下降 (变性) (朱韦 等, 2006) 和 SOD 活性上升趋势 (逐渐失活) (李志国 等, 2007), 从而更加剧了氧自由基积累, 诱发膜脂过氧化, 产生大量 MDA, 最终造成细胞质膜透性增大 (表 1), 膜功能受损 (细胞汁液 pH 值增大); 在严重的酸胁迫下, 甚至引发叶绿体结构或者光合膜系统破坏 (邱栋梁 等, 2002; 余春珠 等, 2005), 使叶片叶绿素含量显著下降, 进而影响光合代谢, 致使净光合速率下降 (表 2)。本试验中, 红花木莲和乐东拟单性木兰在重酸雨 pH 2.0 处理下, 叶片净光合速率显著下降的同时, 胞间 CO_2 浓度显著上升, 气孔限制值显著下降 (表 2), 这可能是由于重度酸雨严重损伤了叶片叶绿体结构或者光合膜系统, 影响了光合系统 II 活性、光合电子传递速率和光合色素含量等非气孔因子 (Farquhar & Sharkey, 1982), 从而导致植物生理代谢紊乱, 最终可能会引起植物的死亡。

许多研究表明, 酸雨对植物各项生理指标的影响可以判断园林植物对酸雨胁迫的生理敏感性及其抗性 (肖艳 等, 2004)。然而, 用单一生理指标的变化程度来衡量供试树种 (品种) 的抗性缺乏科学性和准确性, 故作者采用隶属函数值法和 Fisher 最优分割法对各项生理指标进行综合评价, 以此来探讨园林树种对酸雨胁迫的生理敏感性及其抗性。本试验中得出, 抗酸性强的树种有阔瓣含笑、‘荸荠种’ 杨梅, 抗酸性较强树种有 ‘东魁’ 杨梅、金叶含笑、乐东拟单性木兰, 酸敏感树种有红花木莲。本试验中的结果是在短期高强度的酸雨处理胁迫下通过敏感的生理指标得出的, 但植物叶片、株高、生物量等形态指标是否会受到伤害, 在酸雨之后是否会很快得到恢复, 并通过激发体内的信号传导物质和合成其它次生代谢物来避免下次酸雨的伤害, 还需进一步的试验研究和证实。

References

- Deng Shi-jian, Chen Chu-ying, Zhang Jia-wu, Wang Si-long. 1992. Preliminary studies of the buffering effect of tree grown and leaf litter on simulated acid rain. *Environmental Science*, 13 (3): 10 - 18. (in Chinese)
- 邓仕坚, 陈楚莹, 张家武, 汪思龙. 1992. 树冠及叶凋落物对模拟酸雨缓冲能力的初探. *环境科学*, 13 (3): 10 - 18.
- Farquhar G D, Sharkey T D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review Plant Physiology*, 33: 317 - 345.
- He Kai-yue, Li Xiao-chu, Huang Li-bin, Zhang Yong-bing, Hu Xiao-jian. 2004. Effects of drought stress on physiological and biochemical indices in five tree species of Magnoliaceae. *Journal of Plant Resources and Environment*, 13 (4): 20 - 23. (in Chinese)
- 何开跃, 李晓储, 黄利斌, 张永兵, 胡晓健. 2004. 干旱胁迫对木兰科 5 树种生理生化指标的影响. *植物资源与环境学报*, 13 (4): 20 - 23.
- Huang Jian-chang, Wu Xian-bin, He Shi-you. 2005. Simulation test on growth and development of wampee by acid rain. *South China Fruits*, 34 (4): 35 - 37. (in Chinese)
- 黄建昌, 吴贤彬, 何仕友. 2005. 酸雨对黄皮生长发育影响的模拟试验. *中国南方果树*, 34 (4): 35 - 37.
- Jiang Wei-bing, Cao Jing, Li Gang, Weng Mang-ling. 2005. Development of new ornamental tree species of magnolia family in China and its application in landscaping. *Acta Agriculturae Shanghai*, 21 (2): 68 - 73. (in Chinese)
- 姜卫兵, 曹 晶, 李 刚, 翁忙玲. 2005. 我国木兰科观赏新树种的开发及在园林绿化中的应用. *上海农业学报*, 21 (2): 68 - 73.
- Jiang Wei-bing, Li Gang, Weng Mang-ling, Jiang Wu, Cao Jing, Wang Liang-ju. 2007. Photosynthesis of five magnolia species in Nanjing City in winter and spring. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18 (4): 749 - 755. (in Chinese)
- 姜卫兵, 李 刚, 翁忙玲, 姜 武, 曹 晶, 汪良驹. 2007. 5 种木兰科树种在南京地区冬春季节的光合特征. *应用生态学报*, 18 (4): 749 - 755.
- Li He-sheng. 2000. Experimental principle and technology of plant biology and biochemistry. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- Li Zhi-guo, Weng Mang-ling, Jiang Wu, Jiang Wei-bing. 2007. Effects of simulated acid rain on some physiological indices of *Parakmeria*

- lotungensis* seedlings. Chinese Journal of Ecology, 26 (1): 31 - 34. (in Chinese)
- 李志国, 翁忙铃, 姜 武, 姜卫兵. 2007. 模拟酸雨对乐东拟单性木兰幼苗部分生理指标的影响. 生态学杂志, 26 (1): 31 - 34.
- Liang Jun, Mai Bo-ru, Zhang You-fei, Li Lu, Tang Xin-ying, Wu Rong-jun. 2008. Effects of simulated acid rain on the growth, yield and quality of rape. Acta Ecologica Sinica, 28 (1): 274 - 281. (in Chinese)
- 梁 骏, 麦博儒, 郑有飞, 李 璐, 唐信英, 吴荣军. 2008. 模拟酸雨对油菜 (*Brassica napus* L.) 生长、产量及品质的影响. 生态学报, 28 (1): 274 - 281.
- Liu Jian-fu. 2007. Stress effects of simulated acid rain on *Myrica rubra*. Chinese Agricultural Science Bulletin, 23 (10): 110 - 113.
- 刘建福. 2007. 模拟酸雨对杨梅生理生化特征的影响. 中国农学通报, 23 (10): 110 - 113.
- Lü Jun-liang, Li San-yu, Huang Shou-bo, Zhu Cheng, Fu Liu-song. 1999. Effects of simulated acid pain on grape leaves and pollens. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 5 (5): 459 - 463. (in Chinese)
- 吕均良, 李三玉, 黄寿波, 朱 诚, 傅柳松. 1999. 模拟酸雨对葡萄叶片和花粉的影响. 应用与环境生物学报, 5 (5): 459 - 463.
- Mao lin-chun, Fang xue-hua, Pang hua-qing. 2004. Effect of 1-MCP on postharvest physiology and quality of Chinese bayberry fruit. Scientia Agricultura Sinica, 37 (10): 1532 - 1536. (in Chinese)
- 茅林春, 方雪花, 庞华卿. 2004. 1-MCP对杨梅果实采后生理和品质的影响. 中国农业科学, 37 (10): 1532 - 1536.
- Qiu Dong-liang, Liu Xing-hui. 1999. Advances in the injury mechanism of acid rain on horticultural plants. Journal of Fujian Agricultural University: Natural Science, 28 (1): 2 - 32. (in Chinese)
- 邱栋梁, 刘星辉. 1999. 酸雨对园艺植物危害机理的研究进展. 福建农业大学学报: 自然科学版, 28 (1): 2 - 32.
- Qiu Dong-liang, Liu Xing-hui, Guo Su-zhi. 2002. Effects of simulated acid rain stress on gas exchange and chlorophylla fluorescence parameters in leaves of longan. Acta Phytoecologica Sinica, 26 (4): 441 - 446. (in Chinese)
- 邱栋梁, 刘星辉, 郭素枝. 2002. 模拟酸雨对龙眼叶片气体交换和叶绿素 a 荧光参数的影响. 植物生态学报, 26 (4): 441 - 446.
- Shi Jing-nan, Zhao Xiu-ying, Wang Tao. 2005. The law of geographical coefficient of variation and Fisher optimum split method Monitor and optimize the application while layouting in the surrounding air. Environmental science and management, 30 (5): 90 - 92. (in Chinese)
- 史竞男, 赵秀颖, 王 涛. 2005. 地理变异系数法和 Fisher 最优分割法在环境空气监测优化布点中的应用. 环境科学与管理, 30 (5): 90 - 92.
- Tatiana S, John M, Anthony L. 2002. Soybean electrophysiology: Effects of acid rain. Plant Science, 162: 723 - 731.
- Xiao Yan, Huang Jian-chang, Liu Shao-xian, Yang Wei-zhao, Guo Dong-sheng, Zhu Ling-zhi. 2004. Inhibitory effects of simulated acid rain on the growth of 12 garden plant species and their physiological response to it. Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science Edition, 26 (3): 270 - 273, 276.
- 肖 艳, 黄建昌, 刘少娴, 杨伟钊, 郭冬升, 朱凌志. 2004. 模拟酸雨对 12 种园林植物的伤害及敏感性反应. 西南农业大学学报: 自然科学版, 26 (3): 270 - 273, 276.
- Yu Chun-zhu, Wen Da-zhi, Peng Chang-lian. 2005. Sensitivity and resistance of three woody species to acid rain pollution. Ecology and Environmental Sciences, 14 (1): 86 - 90. (in Chinese)
- 余春珠, 温达志, 彭长连. 2005. 三种木本植物对酸雨的敏感性和抗性. 生态环境, 14 (1): 86 - 90.
- Zhang Hong-yu, Liu Ka, Zhong Ping-an, Wang Feng-jian, Huang Ying-jin, Xu Zheng-jin. 2006. Comprehensive evaluated on heat tolerance at grain filling stage of different rice varieties. Acta Ecologica Sinica, 26 (7): 2154 - 2160. (in Chinese)
- 张宏玉, 刘 凯, 钟平安, 王锋尖, 黄英金, 徐正进. 2006. 水稻品种灌浆期耐热性的综合评判. 生态学报, 26 (7): 2154 - 2160.
- Zheng Cheng-le, Xu Wei-dong, Guo Jian-jing, Chen Wei-jian, Qiu Wei-qin, Wu Xian-zhi. 2009. Variation of leaf mineral nutrient content in *Myrica rubra* Sieb. et Zucc during flower-bud physiological differentiation. Chinese journal of tropical crops, 30 (5): 584 - 588. (in Chinese)
- 郑诚乐, 许伟东, 郭建靖, 陈伟建, 邱伟琴, 吴宪志. 2009. 杨梅花芽生理分化期叶片矿质元素含量动态变化. 热带作物学报, 30 (5): 584 - 588.
- Zhu Wei, Wei Hong, Peng Yue, Qi Dai-hua, Huang Lin, Gao Xi-ming. 2006. Ecophysiological effects of simulated acid rain on seedlings of *Gordonia acuminata*. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 31 (2): 147 - 150. (in Chinese)
- 朱 韦, 魏 虹, 彭 月, 齐代华, 黄 林, 高喜明. 2006. 模拟酸雨对四川大头茶幼苗的生理生态影响. 西南师范大学学报: 自然科学版, 31 (2): 147 - 150.